

Estrutura de Dados Topológica para Operações de Manipulação de Objetos Gráficos 2D/3D

Ana Beatriz Almeida Vanderlei
Bacharelado em Ciencia da Computação
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco
Garanhuns, Pernambuco, Brasil
Email: anabiaavanderlei@gmail.com

Ícaro Lins Leitão da Cunha
Bacharelado em Ciencia da Computação
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco
Garanhuns, Pernambuco, Brasil
Email: icaro.cunha@ufape.edu.br

Resumo—Ferramentas atuais para manipulação de malhas 3D e operações topológicas avançadas são limitadas ou especializadas. Este trabalho apresenta uma aplicação gráfica em C++ para visualização e manipulação de malhas bidimensionais e tridimensionais, visando suprir essa lacuna. A metodologia baseia-se na Estrutura de Dados Topológicas *Mate Face*, utilizando representação explícita de dados e pré-processamento para otimização. Resultados validam sua funcionalidade em malhas variadas, e comparativos de desempenho mostram que a abordagem proposta, com pré-processamento, é significativamente mais rápida em operações topológicas, especialmente em malhas complexas.

Abstract—Current tools for 3D mesh manipulation and advanced topological operations are limited or specialized. This work presents a C++ graphical application for visualizing and manipulating two-dimensional and three-dimensional meshes, aiming to fill this gap. The methodology is based on the *Mate Face Topological Data Structure*, using explicit data representation and preprocessing for optimization. Results validate its functionality on various meshes, and performance comparisons show that the proposed approach, with preprocessing, is significantly faster in topological operations, especially on complex meshes.

I. INTRODUÇÃO

A modelagem geométrica é uma atividade de caráter interdisciplinar, integrando os avanços da geometria computacional, estruturas de dados, análise numérica e aplicações científicas. Embora inicialmente restritas a contextos puramente numéricos, com a evolução da capacidade de processamento dos computadores, o aprimoramento constante dos modeladores geométricos e o progresso das aplicações científicas, as malhas computacionais tornaram-se mais versáteis e complexas [1], [2].

Devido à sua versatilidade, as malhas são ferramentas essenciais para a representação de domínios e simulações, em nível bidimensional e tridimensional. Consequentemente, a etapa de geração de malhas e a definição de sua geometria são essenciais para qualquer projeto, pois é fundamental a representação adequada do domínio físico analisado, equilibrando o seu nível de refinamento e o custo do processamento computacional. [1].

Nesse cenário, ferramentas de visualização e manipulação de malhas possuem um papel fundamental, permitindo que o usuário interaja com elas de forma rápida e eficiente, independentemente do contexto de aplicação. No entanto, as

soluções existentes na literatura e no mercado de desenvolvimento frequentemente se limitam a malhas bidimensionais, carecendo de suporte para operações topológicas avançadas em ambientes tridimensionais, ou, quando lidam com malhas tridimensionais, são computacionalmente custosas ou excessivamente especializadas. Essa lacuna aponta para a necessidade de ferramentas mais versáteis para a geração e manipulação generalizada de malhas.

Diante das lacunas nas ferramentas existentes, este trabalho teve como objetivo estudar Estruturas de Dados Topológicas (EDT) e desenvolver uma aplicação gráfica capaz de visualizar e manipular malhas bidimensionais e tridimensionais.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste trabalho, os conceitos de malha e de complexo celular são utilizados de forma equivalente. Para compreender as topologias abordadas, apresentam-se os conceitos fundamentais de células e complexos celulares, seguidos pela demonstração da topologia de malhas.

A. Complexo Celular

Complexos celulares são estruturas matemáticas fundamentais para a representação discreta de domínios geométricos. Uma célula é definida como um conjunto convexo afim gerado por pontos, com sua dimensão correspondendo à dimensão do espaço afim que a define. Um complexo celular é uma coleção finita e topologicamente consistente de tais células, onde as intersecções ocorrem apenas em faces comuns [3], [4].

No escopo deste trabalho, o maior complexo celular com o qual operamos é tratado como a própria malha. Abordamos malhas bidimensionais e tridimensionais, compreendendo tanto complexos celulares simples quanto mistos [1]. A Figura 1 ilustra os tipos de células utilizados e sua composição em malhas.

B. Malhas

As malhas computacionais são diferenciadas principalmente por sua topologia, que descreve a relação de conectividade entre seus elementos. Na literatura, são classicamente divididas em três tipos: estruturadas, não-estruturadas e híbridas.

As malhas estruturadas caracterizam-se por nós internos com um número constante de elementos adjacentes, resultando em uma topologia uniforme e conectividade implícita.

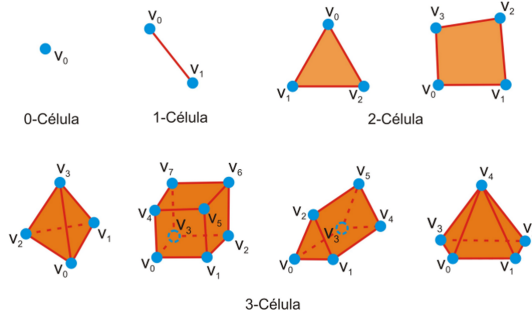


Fig. 1. Tipos de células trabalhadas no escopo do projeto

Em contraste, malhas não-estruturadas apresentam nós com um número variável de adjacências, necessitando do cálculo de conectividade para gerenciar sua topologia. As malhas híbridas são formadas pela combinação de diferentes tipos, não seguindo um padrão topológico único [5], [6]. A Figura 2 ilustra essas distinções.

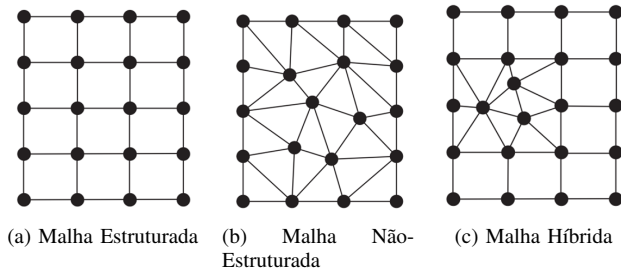


Fig. 2. Exemplos de tipos de malha

III. TRABALHOS RELACIONADOS

As EDTs indexam os elementos da malha para representar suas relações de incidência e adjacência, garantindo acesso eficiente às informações topológicas [3].

Na literatura, diferem-se principalmente na forma de armazenamento das células e nos tipos de malhas suportados - 2D, 3D ou ambos. Quanto ao armazenamento, as estratégias variam entre a representação implícita, onde as relações são calculadas via relações algébricas [7], e a representação explícita, na qual essas relações são armazenadas diretamente em listas ou vetores [8].

A. Mate Face

A estrutura *Mate Face* (MF), proposta por Cunha [1], foi a base escolhida para este estudo devido à sua capacidade de suportar a maior variedade de malhas dentre as EDTs presentes na literatura. A MF estende a *Opposite Face* (OP) [9] visando maior flexibilidade e simplificação para trabalhar com um leque amplo de tipos de malha, permitindo o trabalho com malhas bidimensionais - simples ou mistas - e malhas tridimensionais - apenas simples.

A MF diferencia-se da OP primariamente na sua forma de representação de dados: malhas bidimensionais explicitam

vértices, arestas e faces, enquanto malhas tridimensionais explicitam vértices e células. Todas essas representações são gerenciadas por um vetor dinâmico de elementos, o que otimiza o uso de memória.

IV. METODOLOGIA

Com o objetivo de oferecer funcionalidades de visualização, manipulação e operações topológicas em malhas geométricas, uma aplicação gráfica foi desenvolvida. Este trabalho suporta a mesma composição de malhas da estrutura *Mate Face* (MF) e é compatível com os formatos de arquivo .OFF, .OBJ, .VTK e .STL.

Desenvolvida em C++, a aplicação garante suporte a diversos sistemas operacionais ao aproveitar o suporte nativo da linguagem para bibliotecas de visualização gráfica como o *OpenGL*. Para aprimorar a versatilidade em operações topológicas e diferenciar-se da estrutura MF, a implementação adota representação explícita dos dados - por meio de vetores - e um processo de pré-processamento. A Figura 3 ilustra o fluxograma geral da aplicação.

A. Pré-processamento de Dados

Como na implementação da estrutura utilizamos da representação explícita de dados via vetores para armazenamento e visualização, o pré-processamento de dados é uma estratégia essencial para otimizar o custo computacional. Adicionalmente, ele auxilia na correção de malhas defeituosas ao eliminar duplicações e garantir a correta ligação dos elementos. A etapa de pré-processamento torna-se crucial para lidar com malhas volumosas ou durante a execução de operações topológicas, pois garante a construção eficiente das relações de adjacência e incidência entre os elementos da malha. Para isso, algumas funções de pré-processamento foram desenvolvidas, incluindo:

- **Cálculo de arestas:** A função *calculateEdges* identifica arestas únicas, para impedir cenários de duplicação.
- **Mapeamento Vértice-Face:** Por meio da função *computeVertexToFaces*, é criado um vetor que associa cada vértice às faces que o contêm.
- **Mapeamento de adjacência entre as faces:** A função *computeFaceAdjacency* gera um vetor que relaciona cada face com as demais que compartilham arestas.

B. Estratégia de Picking de Malha

Para identificar interativamente o componente da malha que o usuário deseja manipular, a aplicação emprega a estratégia de *color picking*. Nesse método, cada vértice ou face é desenhado internamente com uma cor única baseada em seu índice. A leitura do pixel sob o cursor do mouse permite identificar a cor da região e, conseqüentemente, o elemento selecionado de forma eficiente.

C. Funções de Manipulação da Malha

A aplicação oferece um conjunto de funções de manipulação de malhas, categorizadas em quatro grupos principais:

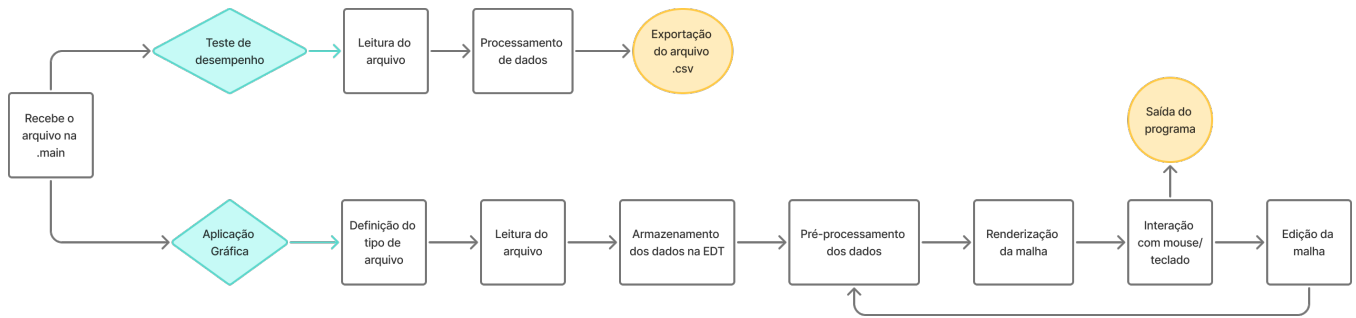


Fig. 3. Fluxograma da aplicação desenvolvida

- **Seleção e Mapeamento:** Permite relacionar vértices e faces, realizando mapeamentos de pertencimento e vizinhança com base em operações topológicas.
- **Criação, Subdivisão e Exclusão:** Inclui a criação de novas faces e vértices, bem como a subdivisão de faces existentes e a remoção de faces e vértices.
- **Edição de Coordenadas:** Possibilita a modificação direta das coordenadas dos vértices.
- **Ajustes e Atualização Visual:** Garante o retorno visual imediato das modificações e seleções realizadas na malha.

V. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a aplicação desenvolvida, demonstrando sua capacidade de visualização e manipulação de malhas, bem como o desempenho das operações topológicas.

A. Malhas Bidimensionais

São ilustrados exemplos visuais de malhas bidimensionais, incluindo casos de pequena e grande escala. A composição das malhas utilizadas podem ser visualizada na Tabela I e os seus respectivos resultados nas Figuras 4 e 5.

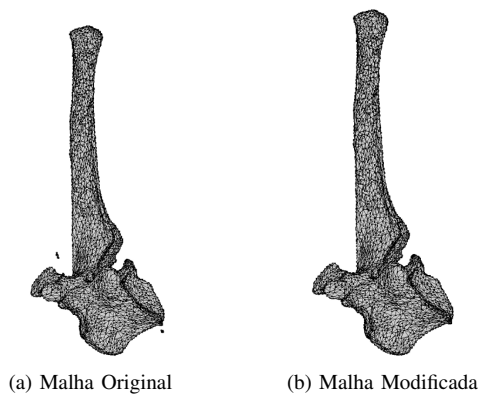


Fig. 4. Visualização da malha 9-vertebra-equina.obj

B. Malhas Tetraédricas

No caso de malhas tetraédricas, as Figuras 6 exemplificam o processamento de sua topologia e o comportamento das funções de manipulação.

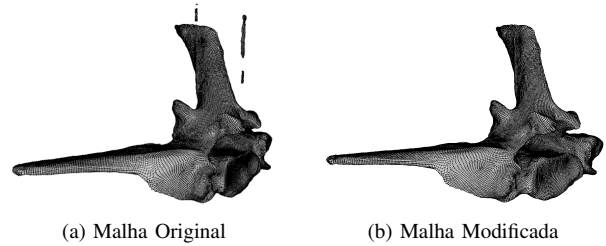


Fig. 5. Visualização da malha 5-vertebra-equina.obj

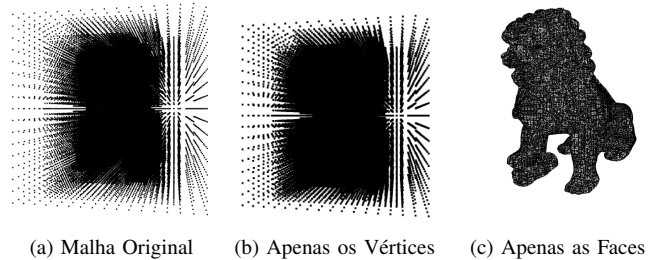


Fig. 6. Visualização da malha tridimensional

C. Análise de Desempenho

Para validar a aplicação, realizou-se um comparativo de desempenho de operações topológicas entre a estrutura desenvolvida, uma estrutura puramente vetorial - sem otimização - e a *Mate Face*. Os testes foram conduzidos em um computador equipado com processador *Intel Core i5-12400F* e 32GB de memória RAM.

Para isso, as operações topológicas avaliadas incluíram o tempo de acesso a faces incidentes e vértices vizinhos (para vértices), e a vértices componentes e faces vizinhas (para faces). As quantidades de elementos acessados para cada operação também foram registradas para análise.

A Tabela I apresenta as malhas utilizadas neste comparativo.

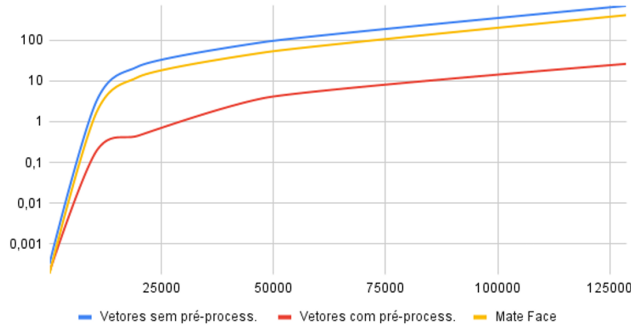
O tempo total de processamento - em segundos - para todas as operações topológicas nas malhas escolhidas pode ser visualizado na Tabela II e melhor comparado nas Figuras 7. É importante notar que, como a EDT *Mate Face* trabalha com representação implícita de faces e arestas em células tridimensionais, não foi possível realizar as mesmas operações topológicas sem modificar sua estrutura original.

TABLE I
ESTRUTURA DAS MALHAS UTILIZADAS NA ANÁLISE DE DESEMPENHO

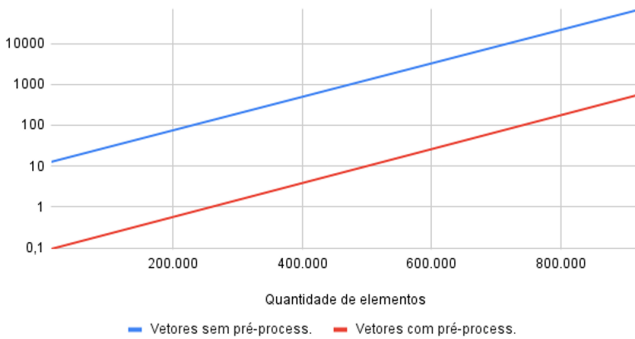
Nome	Tipo	Nº de Vértices	Nº de Faces
cubo.stl	Quadrilátera	8	6
hand-hybrid.of	Mista	6207	4345
9-vertebra-equina.obj	Triangular	6586	13172
indoor-plant.obj	Quadrilátera	25075	22911
5-vertebra-equina.obj	Quadrilátera	64358	64359
tetraHeart.vtk	Tetraédrica	2505	8560
chineseDragon.vtk	Tetraédrica	297344	625635

TABLE II
TEMPO TOTAL DE PROCESSAMENTO - COMPARATIVO INCLUI SEM E COM PRÉ-PROCESSAMENTO (S/PP E C/PP RESPECTIVAMENTE).

Nome	Vetores (s/PP)	Vetores (c/PP)	Mate Face
cubo.stl	0.000325	0.000205	0.000185
hand-hybrid.of	3.267320	0.194441	1.728850
9-vertebra-equina.obj	22.470100	0.450768	12.342500
indoor-plant.obj	90.043800	3.816530	49.950900
5-vertebra-equina.obj	695.517000	26.186800	409.713000
tetraHeart.vtk	12.665600	0.093493	-
chineseDragon.vtk	68291.600000	566.514000	-



(a) Malhas Bidimensionais



(b) Malhas Tridimensionais

Fig. 7. Relação entre número de elementos e tempo de execução

As diferenças de desempenho entre os métodos tornam-se notáveis em malhas de médias a grandes dimensões, sendo que para malhas pequenas, os resultados são computacionalmente imperceptíveis. Uma análise direta entre a abordagem vetorial com pré-processamento e a EDT *Mate Face* revela uma diferença considerável. Focando no tempo de execução das operações na malha, a abordagem vetorial com pré-processamento demonstrou ser significativamente superior em velocidade de processamento.

VI. CONCLUSÃO

No presente trabalho, desenvolveu-se uma aplicação gráfica capaz de manipular malhas em um contexto generalizado, abrangendo diferentes tipos e topologias - 2D e 3D. A eficiência da ferramenta foi validada por meio de testes de desempenho. Como resultado, obteve-se uma ferramenta computacional que oferece visualização, manipulação e operações topológicas avançadas, funcionalidades frequentemente ausentes em aplicações tradicionais de manipulação de malhas.

Como trabalhos futuros, pretende-se aprimorar a análise de desempenho e expandir as funcionalidades da aplicação para novas operações topológicas, bem como para o gerenciamento de renderização, texturas e malhas dinâmicas ou animações. Acelerar tarefas computacionalmente intensivas através do aproveitamento de processamento via GPU também é uma direção promissora para otimizar ainda mais o desempenho.

REFERENCES

- [1] L. L. Cunha, "Estrutura de dados mate face e aplicações em geração e movimento de malhas," Master's thesis, Universidade de São Paulo, 2009.
- [2] F. P. Barbosa and A. Castelo, "Estruturas de dados topológicas aplicadas em simulações de escoamentos compressíveis utilizando volumes finitos e métodos de alta ordem," Master's thesis, Universidade de São Paulo, 2012.
- [3] M. Mantyla, *An introduction to solid modeling*. Computer Science Press, 1988.
- [4] A. Castelo, "Aproximação adaptativa de variedades implícias com aplicações na modelagem implícita e em equações algébrico-diferenciais," Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1992.
- [5] C. R. Maliska, *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacionais*. LCT, 2004.
- [6] R. Lohner, *Applied CFD Techniques — An Introduction based on Finite Element Methods*. John Wiley & Sons, 2001, chapt. 1, pp. 1–7.
- [7] J. Rossignac, A. Safonova, and A. Szymczak, "3d compression made simple: Edgebreaker on a corner table," in *Shape Modeling International Conference*, 2001, pp. 278–283.
- [8] L. G. Nonato, A. Castelo, J. E. P. P. de Campos, H. H. Biscaro, and R. Minghim, "Topological tetrahedron characterization with application in volume reconstruction," *International Journal of Shape Modeling*, vol. 11, no. 2, pp. 189–215, 2005.
- [9] M. Lizier, "Geração de malhas a partir de imagens com textura," Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, 2006, PhD thesis (Qualificação de Doutorado).